

Existe relação entre a complexidade geométrica do entorno dos reservatórios e a variabilidade espacial dos parâmetros limnológicos?

Arcilan Assireu^{1,2}
Fabio Roland¹
Evlyn Novo²
Nathan Oliveira Barros¹
José Luiz Stech²
Felipe Siqueira Pacheco¹

¹ Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF
CAMPUS Universitário – Bairro Martelos – 36036-900 – Juiz de Fora - MG, Brasil
fabio.Roland@ufjf.edu.br
{nathan_obarros, felipeufjf}@yahoo.com.br

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{arcilan, evlyn,stech}@ltid.inpe.br

Abstract. In this paper we test the MacIntyre et al. (2002) hypothesis, which suggests that lakes with complex geometry present larger spatial variability of limnological parameters than lakes with a simple shape. The asymmetrical fragmentation operator (FA) was applied to characterize complex geometry of reservoir contours. Landsat-TM images were used to map reservoirs flooded surface. FA operator was applied to vector files describing reservoirs shape to compute the average FA for five reservoirs: Estreito, Corumbá, Itumbiara, Serra da Mesa e Furnas. These FAs values were compared to spatial variability of limnological parameters. The results show that there is a relationship between FA and the phytoplankton biomass, conductivity, pH and dissolved inorganic carbon.

Palavras-chave: Asymmetrical fragmentation operator, limnologic parameters, sensor TM-Landsat, hydroelectric reservoirs, morphometry, operador de fragmentação assimétrica, parâmetros limnológicos, sensor tm-landsat, reservatórios hidrelétricos, morfometria.

1. Introdução

As bacias de drenagem se diferenciam em função dos padrões de drenagem (Christofolletti, 1986), os quais são influenciados pela: natureza das rochas (disposição e resistência das diferentes litologias), declividade, amplitude altimétrica e história geológica e geomorfológica local. Como consequência dessa complexidade das bacias, o represamento de um rio pode resultar em lagos de formas e complexidade variáveis em diversas escalas.

As diferentes características morfométricas do entorno do reservatório introduz variabilidades locais nas características dos lagos. Por exemplo, regiões do reservatório com entornos mais irregulares e com maiores reentrâncias são regiões em que os corpos d'água estariam, por exemplo, mais abrigados dos efeitos do vento, o que resultaria em tempo de residência mais longo. Neste tipo de entorno, é de se esperar uma maior interação entre o ambiente terrestre e o lacustre, já que as águas costeiras aí estão mais expostas ao ambiente terrestre. Estes fatores têm implicações para os aspectos limnológicos do lago e implicações sociais, visto que a população ribeirinha nestas regiões estaria mais exposta a doenças endêmicas.

Alguns trabalhos objetivaram estudar as implicações da morfometria do entorno de lagos sobre as características destes. Kowalik & Murty (1993) mostraram, através de modelagem

aplicada à circulação em lagos, que as soluções do modelo são significativamente diferentes quando se considera um padrão de entorno suave ou fragmentado (com “braços”). Assireu et al. (2004) indicam haver relação entre a produção primária e o grau de fragmentação do entorno do corpo d’água. Os autores especularam que a existência de interfaces complexas (com grandes zonas litorâneas), com aporte de sedimentos através de inúmeros canais marginais tem um maior impacto sobre o funcionamento do sistema aquático, do que teria um entorno suave. As extensas zonas litorâneas passariam a sustentar comunidades de plantas aquáticas, as quais podem competir ativamente com o fitoplâncton pelos nutrientes e luz disponível para a fotossíntese. MacIntyre et al. (2002) indicam que lagos com entornos geometricamente mais complexos seriam mais fortemente influenciados por diferenças nas taxas de aquecimento, resfriamento e intensidade das misturas devido ao vento do que os lagos com entornos geometricamente simples.

Este trabalho tem por objetivo aplicar a técnica do Operador de Fragmentação Assimétrica (FA), adaptado como classificador de lagos quanto ao grau de complexidade de suas margens (Assireu et al., 2004), no estudo de relações entre a variabilidade espacial de parâmetros limnológicos e a morfometria do entorno do lago. Também, foi aplicada uma versão local do FA, que permite mapear o grau de complexidade morfométrica local do entorno do reservatório. Com isto pode-se verificar, segundo um padrão quantificado, quais as regiões do lago apresentam peculiaridades importantes quanto ao padrão morfométrico, e assim, ver se estas feições influenciam o comportamento das variáveis limnológicas próximas a estas feições.

Este artigo está organizado da seguinte forma: Na Seção 2 são descritos os dados e a metodologia utilizada. Na Seção 3 será feita uma descrição do método e na Seção 4 são apresentados e discutidos os resultados. Na Seção 5 são apresentadas as conclusões.

2. Dados e métodos

Tendo em vista que a forma de um reservatório pode ser representada por um vetor cuja complexidade traduz seus diferentes padrões espaciais, o método GPA (Gradient Pattern Analysis – GPA, introduzido por Rosa et al. (1998)) foi aplicado a dados vetoriais escolhidos para 5 reservatórios hidrelétricos: Reservatório de Serra da Mesa, Furnas, Itumbiara, Corumbá e Estreito. A superfície alagada pelos mesmos foi determinada a partir de imagens digitais do sensor TM-Landsat. Os valores de FA foram obtidos a partir dos dados filtrados por um filtro do tipo média móvel de 10 pontos. Este procedimento elimina as altas frequências, minimiza a subjetividade associada ao procedimento de digitalização e assegura uma amostragem mutuamente independente, ao excluir as influências recíprocas entre pixels vizinhos. Para concentrar as análises em apenas uma das componentes direcionais do reservatório, foi efetuada uma rotação do eixo segundo a direção de máxima variância da distribuição. Valores de variabilidade espacial de vários parâmetros limnológicos como pH, biomassa fitoplanctônica, condutividade, carbono inorgânico dissolvido, Amônia, nitrogênio total e alcalinidade foram cotejados com os valores de FAs dos reservatórios.

3. Fundamentação Teórica

O Operador de Fragmentação Assimétrica é uma técnica eficiente para caracterizar padrões de variabilidade espacial e faz parte do método de análise de padrões dos campos gradientes (Gradient Pattern Analysis – GPA, introduzido por Rosa et al. (1998)). O pressuposto adotado no desenvolvimento do GPA é o de que a complexidade de um padrão espacial é caracterizada pela sua falta de simetria e pelo seu grau de fragmentação. Essas propriedades do padrão (falta de simetria e fragmentação) podem ser resumidas no Operador de

Fragmentação Assimétrica (FA). Padrões simétricos apresentam valores de Fa iguais ou próximos a zero. A partir da análise de aproximadamente 200 simulações de padrões, Rosa et al. (1998) e Rosa et al. (1999) concluíram que o aumento de FA corresponde a um aumento da quantidade e da extensão de contornos e de estruturas finas em diferentes padrões. A **Figura 1** ilustra os resultados das simulações de Rosa et al. (1998). Pode-se observar que à medida que o padrão espacial se torna mais complexo e que há um aumento da variabilidade de pequena escala, o valor de FA aumenta.

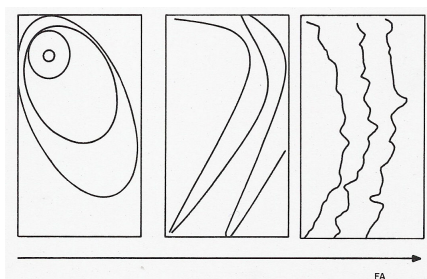


Figura 1 – Resposta teórica do FA à complexidade do padrão espacial Adaptado de Rosa et al. 1998.

Este operador (FA) propicia uma investigação da complexidade espaço-temporal contida na série espaço-temporal. Por não se basear em propriedades estatísticas da série, mas somente nas propriedades locais das simetrias do padrão gradiente, o método apresenta a importante propriedade de ser menos dependente do comprimento da série, quando comparado às técnicas estatísticas convencionais. Isto abre a possibilidade ao método de localizar, ao longo de entornos, quais são as regiões com maior complexidade morfométrica. Alguns detalhes sobre este método serão agora apresentados e maiores detalhes podem ser obtidos em Rosa et al. (1999) e Assireu et al. (2002).

Como já comentado esta técnica foi originalmente desenvolvida para tratar campos bidimensionais representados através de matrizes numéricas. Com o intuito de estender as aplicações do método para séries unidimensionais, Assireu et al. (2002) fizeram a seguinte adaptação:

Cada nove pontos da série são convertidos em uma matriz 3x3 e o método é, desta forma, aplicado ao longo da série. Esta série pode ser, por exemplo, a componente x ou y do entorno de reservatórios. A **Figura 2(a)** exemplifica o método. Um exemplo de uma série unidimensional com nove pontos (**Figura 2(a)**) que é convertida em uma matriz 3x3 (**Figura 2(b)**) e finalmente os campos de gradiente e de triangulação são gerados (**Figura 2(c)** e **2(d)** respectivamente). O valor numérico associado ao processo é obtido por:

$$FA=(I-L)/L, \quad (I \geq L > 0). \quad (1)$$

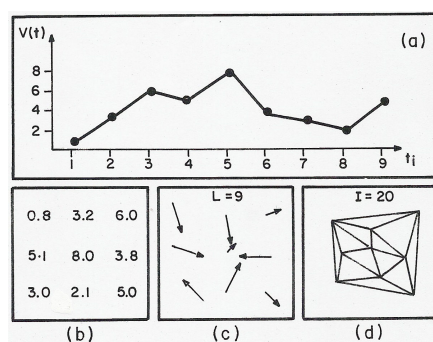


Figura 2 – (a) um típico padrão de variabilidade extraído de uma série relativa a uma variável genérica $V(t)$, (b) sua correspondente matriz; (c) correspondente campo gradiente (nove vetores assimétricos) e (d) campo de triangulação com 20 linhas conectoras (Fonte: Assireu et al. (2002)).

A escolha de se utilizar matrizes 3×3 deve-se à possibilidade das análises serem feitas na melhor janela de resolução e sem comprometimento da robustez do método. Por exemplo, o entorno de um reservatório obtido a partir de uma imagem Landsat em resolução de 20 m, gera um índice (FA) a cada 180m ao longo do entorno.

4. Resultados e Discussão

Os valores de FA foram obtidos para cada reservatório analisado, o que permitiu classificar, em ordem crescente de complexidade morfométrica, os reservatórios estudados (**Figura 3**). Assim, a classificação do entorno dos reservatórios em ordem crescente de complexidade é UHE de Estreito, Corumbá, Itumbiara, Serra da Mesa e Furnas.

A variabilidade dos parâmetros limnológicos foi obtida a partir de medidas das variâncias espaciais entre as várias estações de coleta para cada parâmetro e para cada reservatório em estudo. Na **Figura 4** estes valores são apresentados por ordem crescente de complexidade do entorno dos respectivos reservatórios. Note que existe uma relação direta entre variabilidade espacial da biomassa fitoplancônica e o grau de complexidade do entorno (**Figura 4a**). Para a condutividade, esta relação é razoável, e se torna perfeita quando se exclui Corumbá (**Figura 4b**). Isto indica que, para o caso de Corumbá, há outro fator mais governante para a variabilidade da condutividade do que o grau de complexidade morfométrica do entorno. Para o pH, um acoplamento entre variabilidade deste parâmetro e complexidade morfométrica seria observada ao se excluir Corumbá e Itumbiara da análise (**Figura 4c**). No caso do carbono inorgânico dissolvido (DIC) esta relação seria observada com a exclusão de Itumbiara e Furnas (**Figura 4d**). Portanto, a variabilidade espacial de pH para Corumbá e Itumbiara seriam ditadas por outro forçante maior do que a complexidade do entorno. No caso do DIC, isto ocorreria para Itumbiara e Furnas. Os demais parâmetros analisados não apresentaram relação com a morfometria.

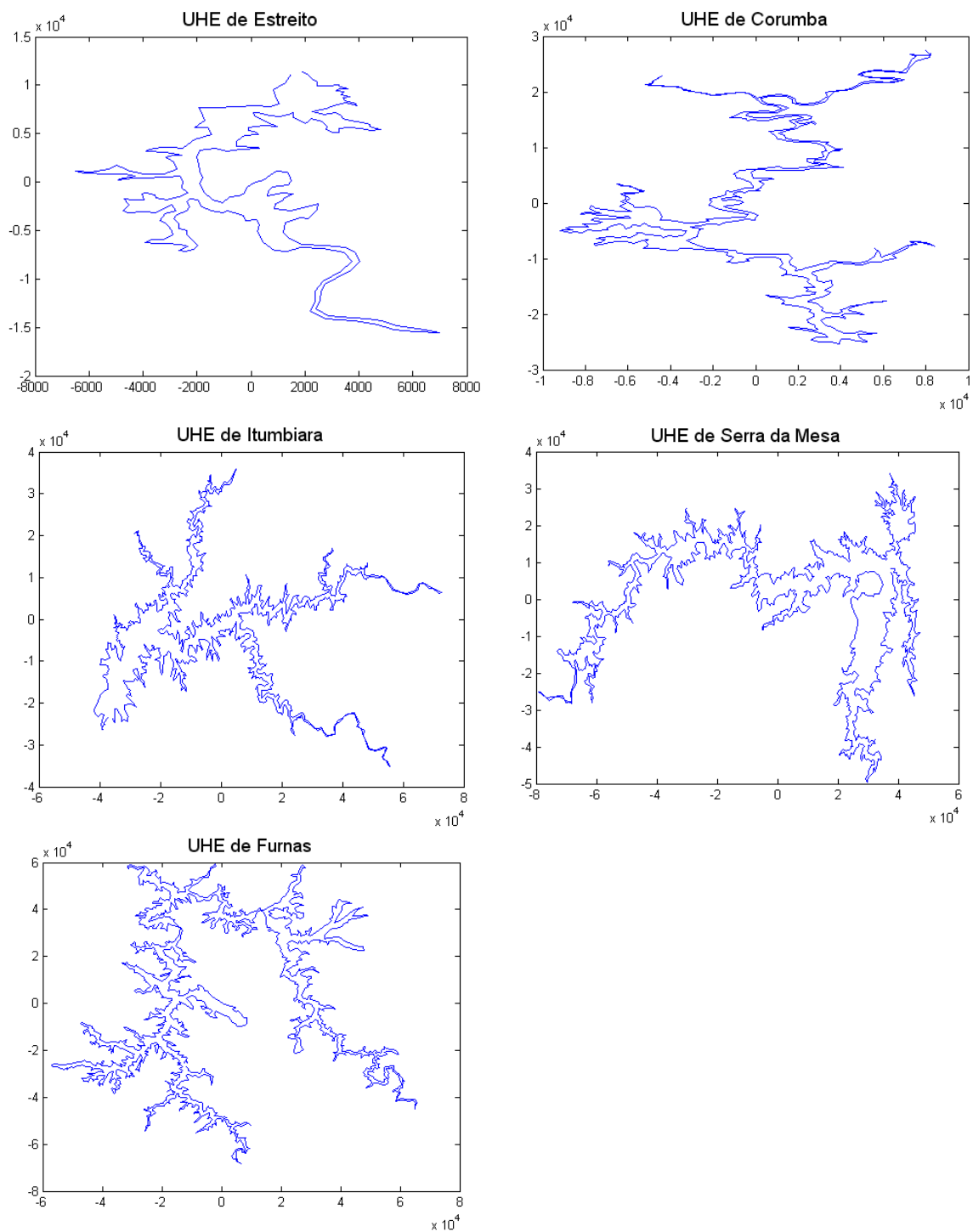


Figura 3 – Classificação dos reservatórios por ordem crescente de complexidade morfológica: UHE de Estreito, Corumbá, Itumbiara, Serra da Mesa e Furnas.

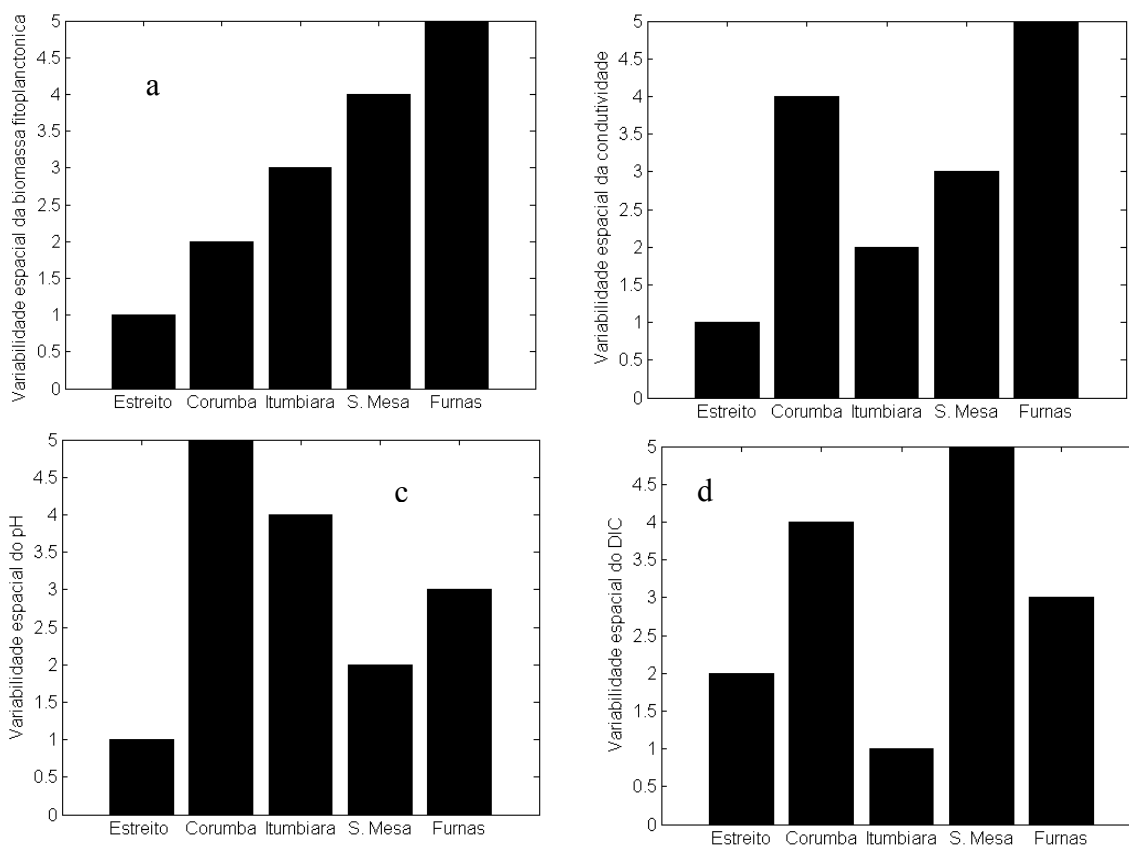


Figura 4 – Variabilidade espacial de parâmetros limnológicos e sua relação com a complexidade morfométrica dos respectivos reservatórios.

5. Conclusão

O grau de complexidade do entorno dos Reservatórios Hidrelétricos de Estreito, Corumbá, Itumbiara, Serra da Mesa e Furnas foram quantificados a partir do Operador de Fragmentação Assimétrica (FA). Os valores tanto médios quanto locais deste classificador de complexidade morfométrica foram cotejados com parâmetros limnológicos coletados ao longo destes reservatórios e em três épocas climatologicamente diferentes. Foram utilizados dados de pH, alcalinidade, condutividade, material em suspensão, carbono orgânico dissolvido (DOC), Carbono Inorgânico Dissolvido (DIC), nitrogênio total e fósforo total.

O valor médio de FA calculado para cada reservatório indicou a seguinte ordem crescente em termos de complexidade morfométrica: UHE de Estreito, Corumbá, Itumbiara, Serra da Mesa e Furnas. A comparação com os valores de variabilidade espacial dos parâmetros limnológicos indicou que biomassa fitoplanctônica, pH, condutividade e carbono inorgânico dissolvido respondem ao nível de complexidade do entorno. No caso da biomassa fitoplanctônica, esta resposta foi observada para os cinco reservatórios. Este resultado parece reforçar o que foi observado por Assireu et al. (2004), no qual os autores mostraram uma clara relação entre produção primária e complexidade morfométrica do entorno dos reservatórios. Também, os valores de variabilidade temporal dos parâmetros limnológicos foram analisados e comparados com os valores de FA local. Foram observadas as maiores variabilidades para as estações influenciadas pelos aportes de rio. Os resultados indicaram também uma boa relação entre regiões de maior complexidade em termos de morfometria de entorno e maior variabilidade temporal da maioria dos parâmetros observados.

6. Agradecimentos

Os autores são gratos a FURNAS Centrais Elétricas pelo suporte ao Projeto “Balanço de Carbono em Reservatórios Hidrelétricos”. Este trabalho é resultado da contribuição entre o Laboratório de Ecologia Aquática da Universidade Federal de Juiz de Fora e da Divisão de Sensoriamento Remoto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Programa Processos da Hidrosfera.

7. Referências Bibliográficas

Artigo em Revista:

Assireu, A.T., Rosa, R.R.; Lorenzzetti, J.A; Vijaykumar, N.L.; Rempel, E.L.; Ramos, F. M.; Sá, L.D. Abreu; Bolzan, M.J.A.; Zanandrea, A. 2002. Gradient pattern analysis of short nonstationary time series: an application to Lagrangian data from satellite tracked drifters. **Physica D**, 168-169: 397-403.

Assireu, A. T.; J. A. Lorenzzetti; E. M. L. M. Novo; J. L. Stech; C. Z. F. Braga; I. B. T. Lima., 2004. Aplicação do Operador de Fragmentação Assimétrica (FA) na caracterização de controles geomorfológicos em reservatórios hidroelétricos. **Revista Brasileira de Geociências**, 32(4):501-508.

Christofoletti, A. (Eds), 1986. Geomorfologia. São Paulo: Edgar Blücher, 188 pp.

MacIntyre S., J. R. Romero, and G. W. Kling, 2002. Spatial-temporal variability in surface layer deepening and lateral advection in an embayment of Lake Victoria, East Africa. **Limnol. Oceanogr.** 43 (3): 656-671.

Mandelbrot, B. , 1991. Objetos Fractais. Lisboa: Gradiva. Rosa, R.R., Sharma, A.S., Valdivia, J.A. 1998. Characterization of localized turbulence in plasma extended system. **Physica A**, 257: 509-514.

Rosa, R.R., Sharma, A.S., Valdivia J.A. 1999. Characterization of asymmetric fragmentation patterns in spatially extended systems. **International Journal of Modern Physics**, C10(1):147-163.